Vonkgeneratoren

Vonken trekken is een favoriete activiteit van vele hobbyisten. Maar daarvoor hebt u wél een flinke hoogspanning nodig. In dit artikel beschrijven wij de diverse mogelijkheden om kV-spanningen te produceren.

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 09-04-2024

Achtergrondinformatie over vonken

De beschreven technieken zijn niet zonder gevaar!
Als u gaat knutselen met de beschreven technieken moet u er terdege rekening mee houden dat dergelijk geknutsel niet ongevaarlijk is! Op de uitgang van de schakelingen kunnen spanningen ontstaan van meerdere honderdduizenden volt en die kunnen dodelijk zijn. De gebruikte condensatoren kunnen, ook na het uitschakelen van het apparaat, nog minutenlang spanningen voeren van honderden volt. Ontlaad dus steeds alle condensatoren in de schakeling met een goed geïsoleerd kortsluitdraadje of wacht minstens tien minuten voordat u iets in de schakeling doet.

Denk ook aan uw gevoelige meetapparatuur!
Denk er bovendien aan dat grote vonken flinke elektromagnetische velden genereren tussen de ontlaad-elektroden en dat uw gevoelige meetapparatuur daar misschien niet tegen bestand is. Trek dus geen vonken op uw normale hobbytafel waar uw multimeter en uw oscilloscoop misschien maar twintig centimeter zijn verwijderd van de vonkgenerator. Zoek een plaats op vér uit de buurt van elektronische apparatuur als u vonken gaat trekken. Uw meetapparatuur is tóch volledig onbruikbaar om iets in dergelijke schakelingen te meten.

Verband tussen de spanning en de vonklengte
Als u experimenteert met de beschreven schakelingen en technieken wilt u uiteraard weten hoe groot de spanning is die uw geknutsel genereert. Die grootte kunt u uiteraard niet meten met uw standaard meetapparatuur. Een zeer onnauwkeurige maar de enige praktisch bruikbare meetmethode is de lengte te meten van de vonken die u kunt trekken. In het algemeen gaat men uit van een richtwaarde van 10.000 V (10 kV) per centimeter vonklengte tussen twee scherp gepunte elektroden in droge lucht. Werkt u met elektroden met bolvormige uiteinden, dan wordt een spanning van 30 kV per centimeter vonklengte aangehouden.
Deze meetmethode is niet nauwkeurig omdat de doorslagspanning van de lucht van een heleboel factoren afhankelijk is, zoals:

- De luchtvochtigheid.
- De temperatuur.
- De luchtdruk.
- Het soort spanning.
- De samenstelling van de lucht.

De definitie van een elektrische vonk
Een elektrische vonk is een plotselinge elektrische ontlading die optreedt wanneer een elektrisch veld tussen twee elektroden zo sterk wordt dat er een geïoniseerd, elektrisch

geleidend kanaal ontstaat in de normaal niet geleidende lucht. De snelle overgang van een niet-geleidende naar een geleidende toestand produceert een korte lichtflits en een harde knal. Men zegt dan dat er '*doorslag*' optreedt en noemt de grootte van de spanning waarbij dit gebeurt de '*doorslagspanning*'.



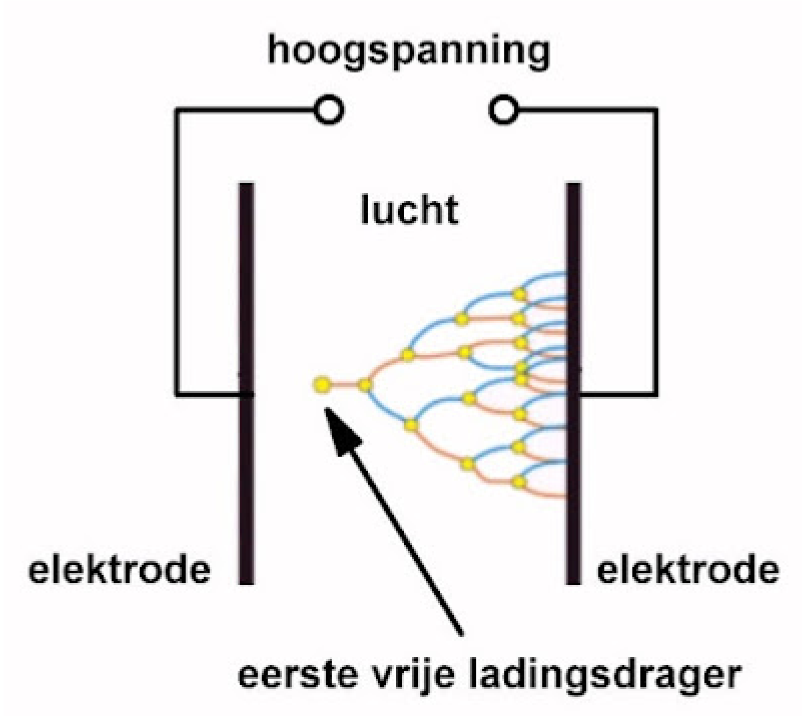
Een typische vonk tussen twee geleiders. (© Adobe Free Stock)

De gevaren van vonken
Zelfs kleine vonken kunnen brandbare materialen, vloeistoffen en gassen ontsteken. Alle vonken produceren immers een '*plasmatunnel*' in de lucht, waar de elektronen doorheen stromen. Dit plasma heeft een temperatuur die hoger is dan deze op het oppervlak van de zon. Vandaar dat zelfs de allerkleinste vonken van een gasaansteker in staat zijn het gas te laten ontbranden. Ook kunnen vonken gemakkelijk kleine, plaatselijke brandwonden veroorzaken.
De zeer hoge temperatuur in de plasmatunnel kan schade veroorzaken aan het oppervlak van metalen voorwerpen doordat er plaatselijk wat van het metaal verdampt. Dit noemt met het '*pitten*' van het metaal en dit verschijnsel wordt gebruikt bij het elektrisch etsen van teksten of pictogrammen in gladde metalen oppervlakken. Een bekend apparaat dat hiervoor werd ontwikkeld is de '*Sparcatron*'.
Zelfs laagenergetische vonken kunnen de geleidingsbanen van het menselijk zenuwstelsel overbelasten, waardoor plaatselijke spiersamentrekkingen kunnen ontstaan of het hartritme wordt verstoord. Tot slot produceren alle vonken ozon dat, in voldoende hoge concentraties, ademhalingsproblemen kan veroorzaken en schadelijk is voor sommige kunststoffen.

Het principe van elektrische doorslag
Een elektrische stroom ontstaat doordat een grote hoeveelheid elektrisch geladen deeltjes in één richting door een materiaal gaat vloeien. Die deeltjes worden tot dit gedrag aangezet als u over het materiaal een elektrische spanning aanbrengt die een elektrisch veld veroorzaakt. De geladen deeltjes waaruit de elektrische stroom bestaat worden '*ladingdragers'* genoemd. In metalen bestaan deze ladingsdragers uit de elektronen die aanwezig zijn op de buitenste schillen van de atomen. Deze zijn zeer beweeglijk en kunnen van atoom naar atoom springen. Dat verschijnsel veroorzaakt het goed geleiden van de elektrische stroom door metalen. In geleidende vloeistoffen (elektrolyten) en plasma's zijn de ladingdragers elektrisch geladen atomen die '*ionen*' worden genoemd.
In materialen die de elektrische stroom niet geleiden, zoals lucht, zijn de ladingdragers stevig gebonden aan hun atomen. Er is dan een heel sterk elektrisch veld noodzakelijk, dus een zeer hoge spanning, om die binding te verbreken en een elektrische stroom te veroorzaken. Bij een bepaalde veldsterkte neemt het aantal vrije ladingsdragers in het materiaal plotseling heel sterk toe waardoor het materiaal een geleider wordt. Dit verschijnsel wordt '*elektrische doorslag*' genoemd.

De Townsend-ontlading
In de lucht zijn, als gevolg van processen zoals foto-ionisatie en straling door radioactief verval, altijd een paar vrije ladingsdragers aanwezig. Deze worden door het elektrisch veld van de hoge spanning versneld en zullen bij een botsing met atomen uit de lucht extra elektronen uit de atomen bevrijden. Ook die elektronen worden versneld en veroorzaken

weer nieuwe bevrijde elektronen. Er ontstaat dus een kettingreactie die een '*Townsend-ontlading*' wordt genoemd. Zo'n Townsend-ontlading uit zich onder de vorm van een vonk(je). Atomen in de lucht die door de Townsend-ontlading een of meerdere elektronen hebben verloren noemt men '*ionen*' Het proces waardoor dit gebeurt noemt men bijgevolg '*de ionisatie van de lucht*'.



Het principe van de Townsend-ontlading.
(© 2024 Jos Verstraten)

Het lichtverschijnsel van een vonk
Waarom ziet u een vonk als een lichtflits? Door de Townsend-ontlading ontstaan ionen in de lucht. Zo'n ion bevindt zich in een onstabiele toestand en zal er naar streven stabiel te worden door het opnieuw opnemen van elektronen. Bij dit recombinatie-proces komt energie vrij onder de vorm van lichtdeeltjes of '*fotonen*'. Deze fotonen hebben verschillende energieniveaus, wat resulteert in licht van verschillende kleuren en intensiteiten.
Tijdens het ontstaan van de vonk wordt echter plaatselijk ook heel veel warmte gegenereerd, waardoor de moleculen in de lucht even kunnen gaan gloeien. Ook dat zal bijdragen aan de lichtemissie.

Het geluidsverschijnsel van een vonk
Tijdens het vonkproces wordt een aanzienlijke hoeveelheid warmte geproduceerd. Deze warmte verhoogt de temperatuur van de omringende lucht en doet deze uitzetten. Deze snelle expansie van de lucht rond de vonk creëert een drukgolf die zich door de lucht voortplant. Deze schokgolf is wat u waarneemt als een knal.
Bij een vonk kan de drukgolf die wordt gegenereerd bovendien sneller bewegen dan het geluid zélf, wat resulteert in een knal die u iets eerder hoort dan het geluid van de drukgolf.

De wet van Paschen
Deze wet is genoemd naar de Duitse natuurkundige Friedrich Paschen, die het fenomeen in 1889 ontdekte en beschreef. Deze wet beschrijft op een wiskundige manier de minimale spanning (U) die nodig is om een gas bij een bepaalde druk (p) te ioniseren en de vonkontlading te starten.
De wiskundige uitdrukking van de wet van Paschen is als volgt:

$$\mathbf{U} = \frac{Bpd}{\ln(Apd) - \ln\left[\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma_{se}}\right)\right]}$$

met:

- U de doorslagspanning in volt
- p de druk in pascal
- d de afstand tussen de elektroden in meter
- γ_{SE} de secundaire-elektronenemissie coëfficiënt
- A de verzadigingsionisatie in de lucht
- B een constante gerelateerd aan de excitatie- en ionisatie-energieën van de lucht

Hoge spanning noodzakelijk
Voor het genereren van een vonk, al is het maar eentje van één centimeter, hebt u spanningen van tientallen kV nodig. Die kunt u niet genereren met de traditionele schakelingen waar u als hobbyist mee te maken krijgt. Maar via de onderstaande niet alledaagse technieken lukt dat wél:

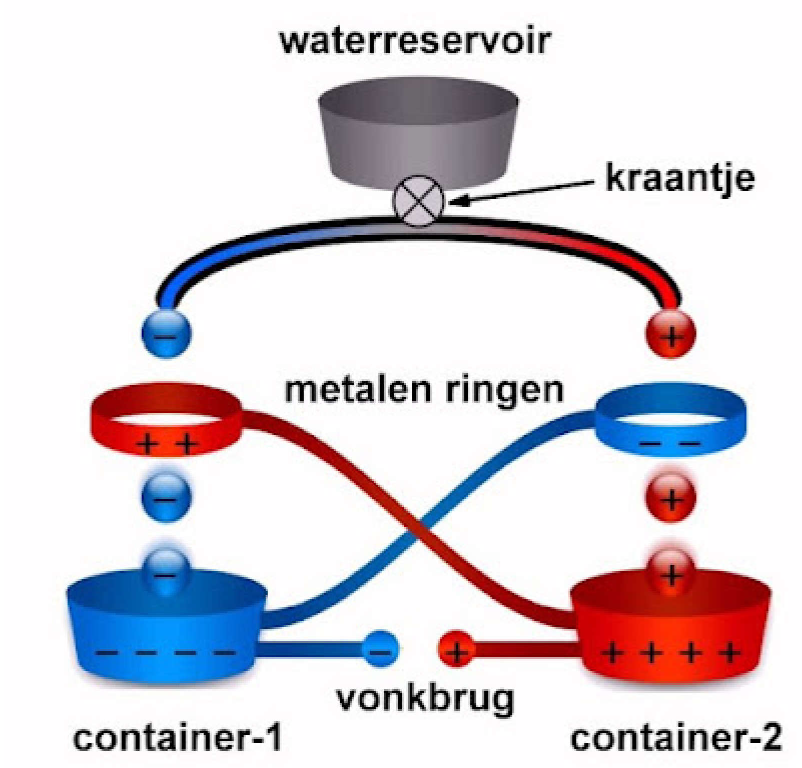
- De Kelvin waterdruppelaar (Kelvin waterdropper)
- De Van de Graaff generator
- De Wimshurst machine
- De Cockcroft–Walton generator
- De Marx-generator
- De Tesla-spoel

Deze zes technieken gaan wij in de volgende hoofdstukken bespreken.

De Kelvin waterdruppelaar

Inleiding
De Kelvin waterdruppelaar is in 1867 uitgevonden door de Schotse wetenschapper William Thomson, getiteld Lord of Kelvin. Het is een elektrostatische generator die gebruik maakt van vallende waterdruppels om spanningsverschillen tussen twee bekers te genereren.

Beschrijving van het apparaat
De standaard samenstelling van een Kelvin waterdruppelaar is voorgesteld in de onderstaande illustratie. Een vat met water (grijs) druppelt via twee slangen water in twee containers (blauw en rood). Deze zijn elektrisch volledig geïsoleerd van hun omgeving opgesteld. De druppels vallen echter eerst door metalen ringen die elektrisch verbonden zijn met de tegenover liggende containers.
Tussen beide containers is een vonkbrug aangebracht, samengesteld uit twee puntige elektroden op een onderlinge afstand van een halve centimeter.



De samenstelling van een Kelvin waterdruppelaar.
(© 2022 Wikimedia Commons - Cmglee, edit 2024 Jos Verstraten)

De werking van het apparaat
Absolute voorwaarde voor de werking van het apparaat is dat er, vóór het opendraaien van het kraantje, een klein ladingsverschil aanwezig is tussen de rode en de blauwe container. Stel dat de rode container een kleine positieve lading heeft. Deze lading wordt via het draadje overgebracht op de linker rode ring. De positieve lading op deze ring zal het ladingsevenwicht van de waterdruppels die door de ring vallen beïnvloeden. Dat is een gevolg van de elektrostatische aantrekkingskracht van Coulomb. In de neutrale waterdruppels is toch een beperkt aantal vrije negatieve ladingsdragers, dus elektronen aanwezig. Deze worden aangetrokken door de positieve lading op de ring. Het oppervlak van een waterdruppel die door deze ring valt zal dus vrije elektronen bevatten. Als de druppel in de linker container valt zal deze negatieve lading zich in deze container verspreiden. Deze container wordt dus iets meer negatief geladen. Deze lading wordt via het blauwe draadje overgedragen naar de rechter ring.
De negatieve lading op deze ring zal de vrije positieve ionen in de waterdruppels aantrekken. Een druppel die door de rechter ring valt krijgt dus een oppervlak dat veel positieve ionen bevat. Als deze druppel in de rechter container valt zal deze meer positief geladen worden. Het zal duidelijk zijn dat dit proces sterker wordt bij iedere waterdruppel die valt. De lading op beide containers en dus op beide ringen wordt immers steeds groter.
Het potentiaal verschil tussen beide containers wordt ook steeds hoger tot deze spanning zo hoog is geworden dat er een vonkje ontstaat tussen de twee elektroden van de vonkbrug.

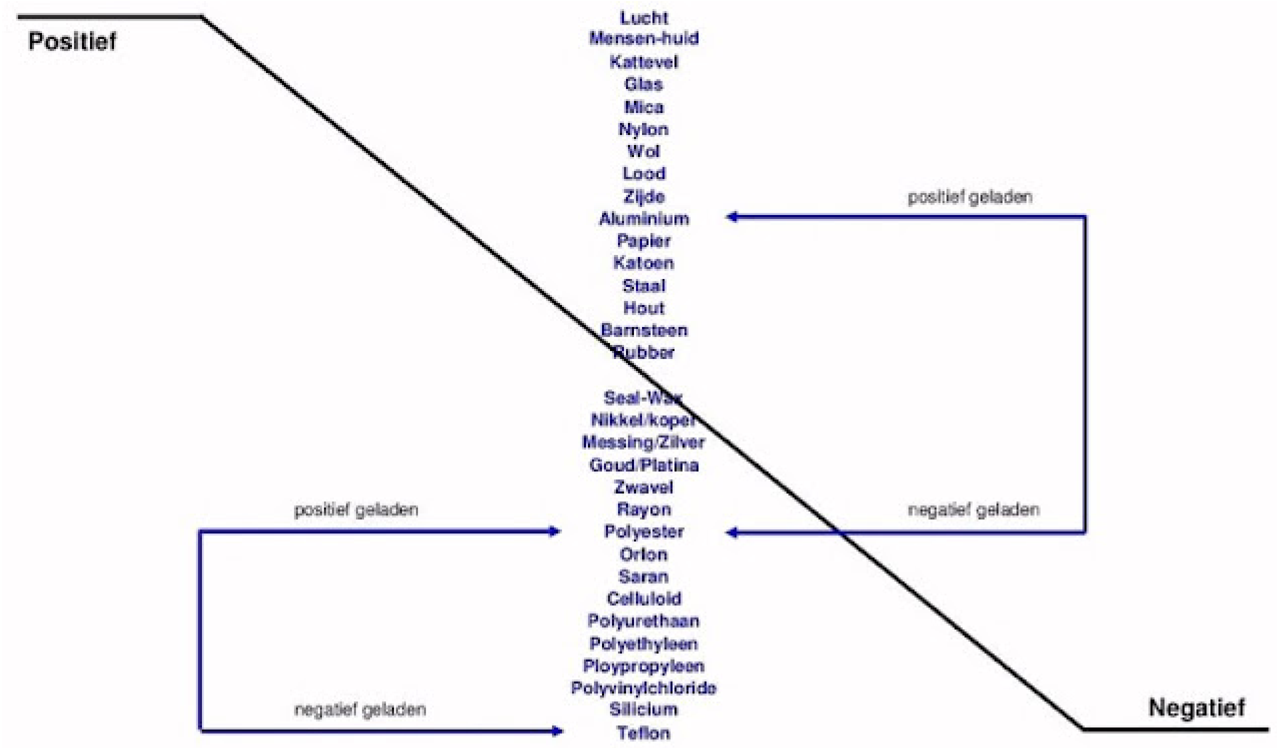
De Kelvin waterdruppelaar in de praktijk
In de onderstaande foto ziet u een praktisch voorbeeld van de druppelaar. In deze uitvoering is het ene bovenste waterreservoir vervangen door twee waterbekers met ieder een druppelaar aan de onderzijde. Op de voorgrond ziet u een metalen strip die de twee reservoirs verbindt zodat zij in een identieke ladingstoestand blijven. De ringen zijn hier twee conservenblikken waarvan de boven- en onderzijde zijn verwijderd. De containers maken contact met twee metalen strippen die via draadjes zorgen voor de ladingsoverdracht naar de ringen. Bij dit model is de vonkbrug vervangen door een kleine TL-buis die wordt ontstoken als de gegenereerde spanning tot een bepaalde waarde is gestegen. De TL-buis produceert dan een lichtflits.



Een gemakkelijk na te maken Kelvin waterdruppelaar.
(© phys-office.phys.washington, edit 2024 Jos Verstraten)

De Van de Graaff generator

Het tribo-elektrische effect
Het is een algemeen bekend verschijnsel dat u kleine vonkjes kunt maken door een wollen trui aan te trekken. U hoort het knetteren! Dit is een gevolg van het '*tribo-elektrische effect*'. Als u twee materialen tegen elkaar wrijft springen er elektronen over van het ene naar het andere materiaal. Het gevolg is dat het ene materiaal een overschot aan elektronen krijgt en negatief wordt geladen. Het andere materiaal krijgt een tekort aan elektronen en wordt positief geladen. Tussen beide materialen ontstaat dus een potentiaalverschil dat zo groot kan worden dat er vonken tussen beide materialen gaan overspringen.
Men heeft de zogenoemde '*tribo-elektrische reeks*' opgesteld die in een vereenvoudigde uitvoering is voorgesteld in onderstaande figuur. Hoe verder de materialen in deze reeks van elkaar af staan, des te hoger de onderlinge elektrostatische spanning als zij met elkaar in wrijvingscontact worden gebracht.
Als u dus een plaatje uit polyester en een plaatje uit teflon tegen elkaar wrijft wordt de polyester plaat positief opgeladen en de teflon plaat negatief.
Van dit verschijnsel wordt gebruik gemaakt in de Van de Graaff generator, waar een bewegende riem elektrische lading van het ene materiaal naar het andere overdraagt.



De tribo-elektrische reeks. (© Elquip)

Een beetje geschiedenis

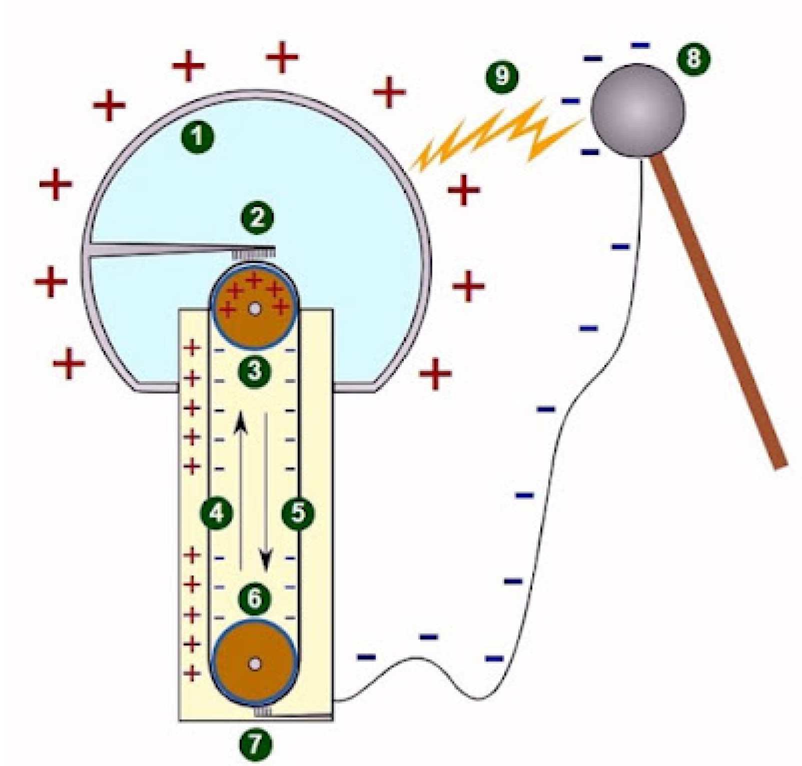
Het idee van ladingsoverdracht door middel van een bewegende riem vindt zijn oorsprong in de Kelvin waterdruppelaar. Kelvin zélf stelde als eerste voor om een riem te gebruiken in plaats van waterdruppels om de lading over te dragen. De eerste elektrostatische machine, die een eindeloze riem gebruikte om de lading te transporteren, werd in 1872 gebouwd door Augusto Righi. In de daarop volgende decenia werden diverse machines ontwikkeld die volgens dit principe werken:

- In 1890 door John Gray
- In 1903 door Juan Burboa
- In 1920 door W. F. G. Swann

De échte Van de Graaff generator werd vanaf 1929 ontwikkeld door natuurkundige Robert J. Van de Graaff aan Princeton University, met hulp van Nicholas Burke. Het eerste model werd gedemonstreerd in oktober 1929. In 1931 bouwde Van de Graaff een apparaat dat een spanning van 1,5 MV (1.500.000 V) kon genereren. Van de Graaff vroeg in december 1931 een patent aan, dat echter werd toegewezen aan het Massachusetts Institute of Technology.

De principiële samenstelling van de Van de Graaff generator

Een doorsnede door een Van de Graaff generator is voorgesteld in de onderstaande figuur. Het apparaat bestaat uit een riem van rubber [4-5] die rond twee rollen [3-6] van verschillend materiaal draait. De bovenste rol [3] is omgeven door een grote holle metalen bol [1]. Bij elke rol is een kamvormige metalen elektrode met scherpe punten [2-7] gemonteerd. De punten maken echter geen contact met de rubber riem, maar staan op een zo klein mogelijke afstand van de riem. De bovenste kam [2] is elektrisch verbonden met de bol en de onderste kam [7] met de aarde.



De samenstelling van een Van de Graaff generator.
(© 2016 Wikimedia Commons - Pilar Mareca)

De werking van de generator
Als de riem wordt aangedreven veroorzaakt het tribo-elektrische effect de overdracht van ladingdragers tussen de ongelijke materialen van de riem en de twee rollen. In het getekende voorbeeld wordt de binnenkant van het rubber van de riem negatief geladen en wordt de bovenste rol positief geladen. De lading op de positieve bovenste rol [3] wekt een zeer hoog elektrisch veld op in de buurt van de punten van de metalen kam [2]. Dit veld is zo sterk dat het in staat is de luchtmoleculen rond de punten van de kam te ioniseren. De vrijgemaakte elektronen van de luchtmoleculen worden aangetrokken naar de buitenkant van de band, terwijl de positieve ionen naar de kam gaan. Bij de kam worden ze geneutraliseerd door elektronen uit het metaal van de bol, waardoor de kam en het oppervlak van de metalen bol een tekort aan elektronen krijgen. Het gevolg is dat de metalen bol een positieve lading krijgt.
Omdat de riem blijft draaien wordt er steeds meer lading van de onderste rol naar de bovenste rol getransporteerd en zal de metalen bol een steeds hogere positieve lading krijgen. Uit de wetten van de elektrostatica volgt immers dat alle positieve lading zich concentreert op het oppervlak van de metalen bol en dat in de bol geen lading wordt 'gevoeld'. Het systeem kan dus lading blijven aanvoeren.
Op een bepaald moment ontstaat echter een evenwicht tussen de aanvoer van lading via de rubberen riem en het afvloeien van lading door lekken en corona-ontlading.
Op het oppervlak van de metalen bol ontstaat dus een zeer hoog potentiaal. De waarde van dit potentiaal is afhankelijk van de grootte van de bol. Hoe groter de bol, hoe hoger het potentiaal.
De vraag blijft hoe de onderste rol lading kan blijven leveren. Dat kan dank zij de onderste kam [7] die met de aarde is verbonden en via zijn sproei-elektrodes de onderste rol van ladingdragers kan blijven voorzien uit de aarde.
In het getekende voorbeeld wordt uitgegaan van het opbouwen van een positieve lading op de bol. Door de keuze van de materialen van de twee rollen kunt u uiteraard ook een negatieve lading op de bol genereren.

De grootte van de gegenereerde spanning
De maximaal op de metalen bol te oogsten spanning is ongeveer gelijk aan de straal R van de bol vermenigvuldigd met het elektrische veld E_{max} waarbij corona-ontladingen beginnen te ontstaan in de lucht, ongeveer 30 kV/cm.

Een Van de Graaff generator met een metalen bol met een diameter van 30 centimeter kan dus een maximale spanning van 450 kV genereren.

Een goedkope experimenteer generator
Het zélf maken van een Van de Graaff generator is een tamelijk grote uitdaging. Er worden uiteraard generatoren aangeboden via AliExpress. Een van de goedkoopste is voorgesteld in onderstaande afbeelding en wordt voor ongeveer € 190,00 geleverd door de '*Module Parts Factory Store*'.



De door de 'Module Parts Factory Store' aangeboden Van de Graaff generator. (© AliExpress)

De Wimshurst machine

Inleiding
De Wimshurst machine is een elektrostatische vonkgenerator die in 1883 werd ontwikkeld door de Britse uitvinder James Wimshurst. Het apparaat wordt gekarakteriseerd door twee grote goed isolerende kunststof schijven die in tegengestelde richting rond dezelfde as draaien. Iedere schijf is voorzien van een groot aantal geleidende segmenten. De segmenten draaien onder twee neutralisatiestaven en twee ladingscollectoren. De van de segmenten afgenomen ladingen worden verzameld in twee Leidse flessen. Deze zijn verbonden met een vonkbrug gevormd door twee metalen bollen.
De Wimshurst machine verzamelt elektrische ladingen door elektrostatische inductie en werkt dus niet volgens het principe van wrijving zoals de Van de Graaff generator.
Een typische Wimshurst machine kan vonken produceren met een lengte van ongeveer een derde van de diameter van de schijven en kan enkele tientallen µA stroom leveren.



Een typisch voorbeeld van een Wimshurst machine. (© AliExpress)

De werking van de Wimshurst machine
De werking van dit apparaat is tamelijk gecompliceerd en wij moeten erkennen dat wij, zelfs na lang zoeken op het internet, geen beschrijving hebben kunnen vinden die de werking voor ons helemaal duidelijk maakt. Wij kunnen de werking van de machine dus helaas slechts in zeer grote lijnen beschrijven.
De twee tegengesteld draaiende schijven, meestal van glas, zijn dus voorzien van een groot aantal metalen segmenten. De machine begint te werken als gevolg van kleine ladingen op die metalen segmenten. Die ladingen worden veroorzaakt door toevallige verschijnselen in de ruimte waarin het apparaat staat opgesteld.
Als de twee schijven met grote snelheid in tegengestelde richting gaan draaien krijgt een bepaald segment een tegengestelde lading geïnduceerd als de lading die aanwezig is in het segment op de andere schijf dat langs het beschouwde segment draait.
De neutralisatiestaven hebben collectorborstels aan hun uiteinden en verbinden elk segment met het segment aan de andere kant van dezelfde schijf. Dit heeft tot gevolg dat het segment aan het ene uiteinde van de staaf de tegenovergestelde lading ontvangt van het segment aan het andere uiteinde. Vervolgens verplaatsen de tegengesteld draaiende schijven de geladen segmenten naar de ladingscollectoren, waar het segment dat de collector aanraakt altijd tegenover een identiek geladen segment op de andere schijf staat. Omdat gelijke ladingen elkaar afstoten, wordt een deel van de lading verwijderd door de ladingcollectoren en opgeslagen in de Leidse flessen.

De Leidse flessen verzamelen de lading tot het moment dat de spanning over de vonkbrug zo groot is geworden dat er overslag plaatsvindt en er een vonk overspringt, waarna het proces zich herhaalt.

Een goedkope Wimshurst machine
Wimshurst machines worden te kust en te keur aangeboden voor prijzen vanaf ongeveer € 100,00. Door het Duitse bedrijf AstroMedia is echter een goedkoop bouwpakket van een Wimshurst machine ontwikkeld dat slechts € 50,00 kost. Het unieke aan dit ontwerp is dat het apparaat vrijwel volledig bestaat uit kartonnen onderdelen die u in en aan elkaar moet lijmen. Deze Wimshurst machine kan vonken genereren tot, zo zegt de fabrikant, 5 cm lang. Wij hebben er ooit eentje gemaakt en het werkt écht, hoewel wij geen 5 cm haalden!



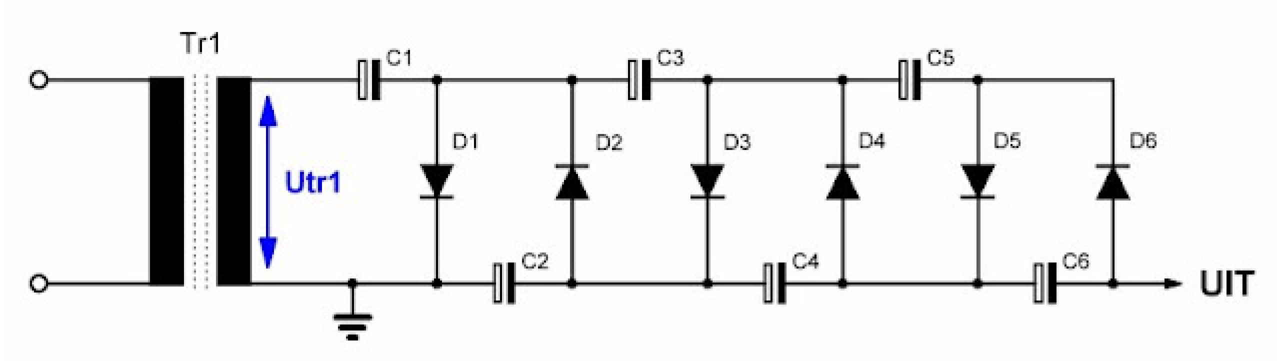
Het kartonnen bouwpakket van Astromedia. (© Astromedia)

De Cockcroft–Walton generator

Inleiding
Nu gaan wij langzaam maar zeker naar de 'normale' elektronica toe! De Cockcroft-Walton generator is een schakeling die een hoge gelijkspanning afleidt uit een veel lagere wisselspanning of uit een veel kleinere pulserende gelijkspanning. Het systeem ontleent zijn naam aan de Britse natuurkundigen John Douglas Cockcroft en Ernest Thomas Sinton Walton, die de schakeling voor het eerst in 1932 gebruikten om de voor een deeltjesversneller noodzakelijke hoge versnellingsspanning te genereren.
In feite werd de basis van deze schakeling reeds in 1919 gelegd door Heinrich Greinacher, een Zwitserse natuurkundige. Cockcroft en Walton borduurden verder op de eenvoudige en overbekende spanningsverdubbelaar die door Greinacher werd ontwikkeld.

De werking van de schakeling
Dat is zonder enige twijfel de eenvoudigste schakeling waarmee u uit een lage wisselspanning een hoge tot zeer hoge gelijkspanning kunt afleiden. Het principe is getekend in de onderstaande figuur. Deze schakeling zat vroeger in iedere beeldbuis-TV, waar een dergelijke cascade van diodes en condensatoren zorgde voor de ongeveer 20.000 V_{dc} hoge naversnellingsspanning die op de binnenkant van het scherm van de beeldbuis stond.

Cockroft-Walton cascades worden bijvoorbeeld ook gebruikt in de bekende plasma-bollen, waarmee u met uw vinger vonken kunt trekken in een met edelgas gevulde glazen bol.



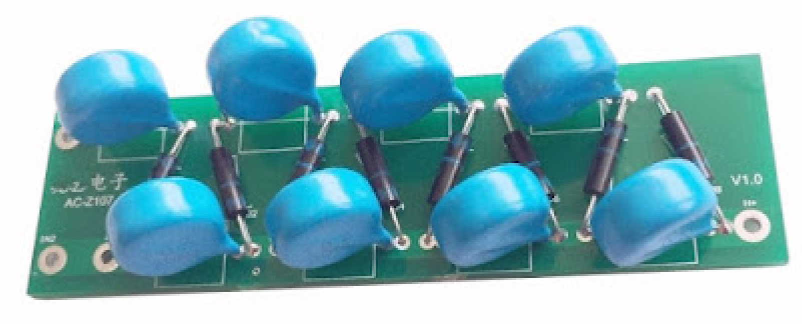
De Cockcroft–Walton hoogspanningsgenerator. (© 2024 Jos Verstraten)

Over de even condensatoren staat een gelijkspanning die ongeveer gelijk is aan twee maal de amplitude van de secundaire trafospanning U_{tr1}. Dat loopt aardig op! Als u voor Tr1 een 230 V scheidingstrafo gebruikt, dus met een secundaire spanning van ook 230 V, dan staat er over de even condensatoren een spanning van:
U_{dc} = 2 • 1,41 • 230 V = 648,6 V
In het getekende voorbeeld zou op de uitgang een gelijkspanning staan van niet minder dan -1,945 kV ten opzichte van de massa! Door het omkeren van alle diodes en condensatoren kunt u uiteraard een positieve uitgangsspanning genereren.

Voor- en nadelen
Het grote voordeel van de Cockcroft-Walton schakeling is dat over alle onderdelen een maximale spanning staat van slechts twee maal de amplitude van de ingangsspanning. U kunt dus gebruik maken van goedkope elco's en normale silicium diodes.
Het grote nadeel is dat de schakeling volgens de halve-periode gelijkrichting werkt. Als de schakeling wordt belast met een uitgangsstroom neemt de spanningsrimpel op de uitgang snel toe naarmate het aantal trappen groter wordt. Dit kunt u weliswaar oplossen met een uitgangsfilter, maar dit vereist afvlakcondensatoren met zeer hoge bedrijfsspanningen en is dus geen praktische oplossing.
Naarmate het aantal trappen toeneemt, beginnen de spanningen over de hogere condensatoren af te nemen als gevolg van de impedantie van de condensatoren in de lagere trappen.

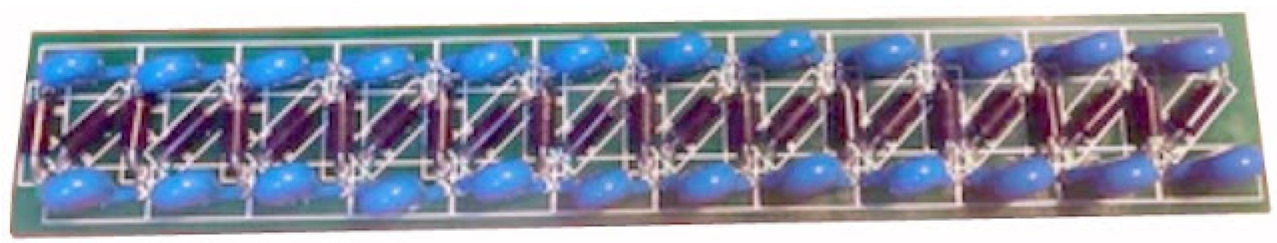
Werken met hoogfrequent wisselspanning
Een aantal van de nadelen kan worden bestreden door de Cockcroft-Walton schakeling niet te voeden met een nettrafo maar met een HF-trafo. De noodzakelijke waarde van de condensatoren wordt dan veel kleiner en bovendien wordt de rimpel veel minder storend en gemakkelijker te verwijderen. Bij het gebruik met 50 Hz netspanning moet u absoluut elco´s gebruiken en deze zijn duur en groot als de werkspanning honderden volt moet bedragen. Bij het gebruik van HF-trafo's kunnen de condensatoren veel lager van waarde zijn en technologisch is het veel gemakkelijker om dergelijke condensatoren te maken die een werkspanning van meerdere kV's hebben.

Cockcroft-Walton als bouwpakket
De eenvoud van de schakeling en het feit dat spelen met schakelingen die vonken kunnen maken erg populair is heeft tot gevolg dat de Chinese elektronica leveranciers zich vol overgave op deze schakeling hebben gestort. U kunt voor een habbekrats printjes en bouwpakketten kopen waarmee u een HF Cockcroft-Walton cascade kunt maken die tientallen kV spanning geneert.
In het onderstaand voorbeeld ziet u een dergelijke print die op AliExpress wordt aangeboden voor € 18,20. Deze schakeling van Qinda Electronics, met als code AC-Z107, heeft acht condensatoren en diodes die bestand zijn tegen werkspanningen van 10 kV. U schijnt hiermee gemakkelijk spanningen tot 60 kV te kunnen genereren!



De Cockcroft-Walton cascade AC-Z107. (© Alibaba)

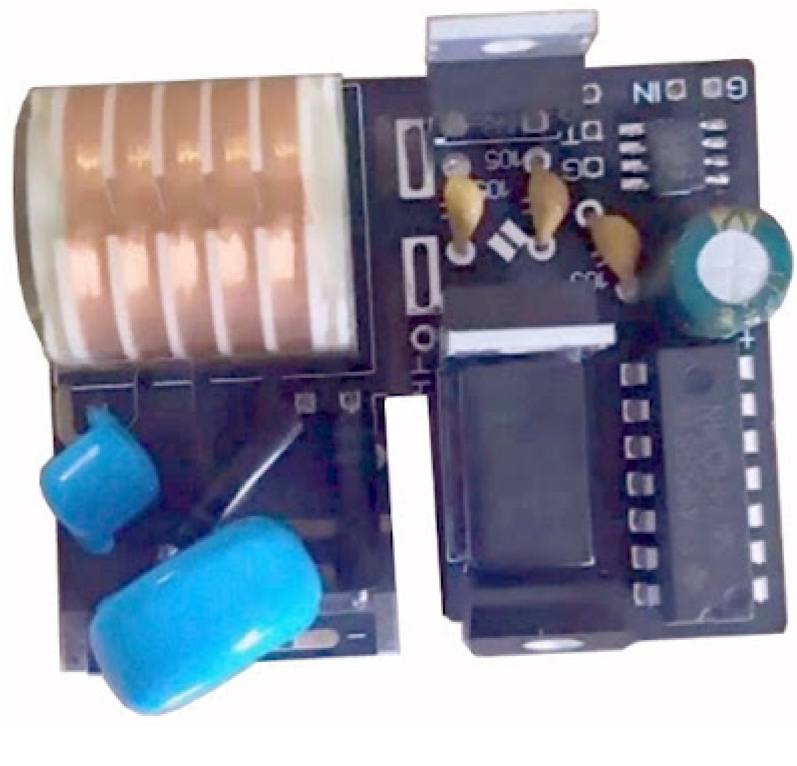
Een tweede vrij goedkope Cockcroft-Walton cascade wordt voorgesteld in de onderstaande figuur. Deze kost € 14,87 bij de Thanks-YouBuy Store (via AliExpress) en bevat 24 condensatoren en diodes. Deze module moet u voeden met een wisselspanning van minimaal 10 kHz en aanbevolen 50 kHz. De schakeling bevat condensatoren met een werkspanning van 6 kV en een waarde van 1.000 pF. Ook hiermee zijn uitgangsspanningen tot 60 kV mogelijk bij een ingangsspanning van 2,5 kV.



Een 24 traps Cockcroft-Walton cascade. (© AliExpress)

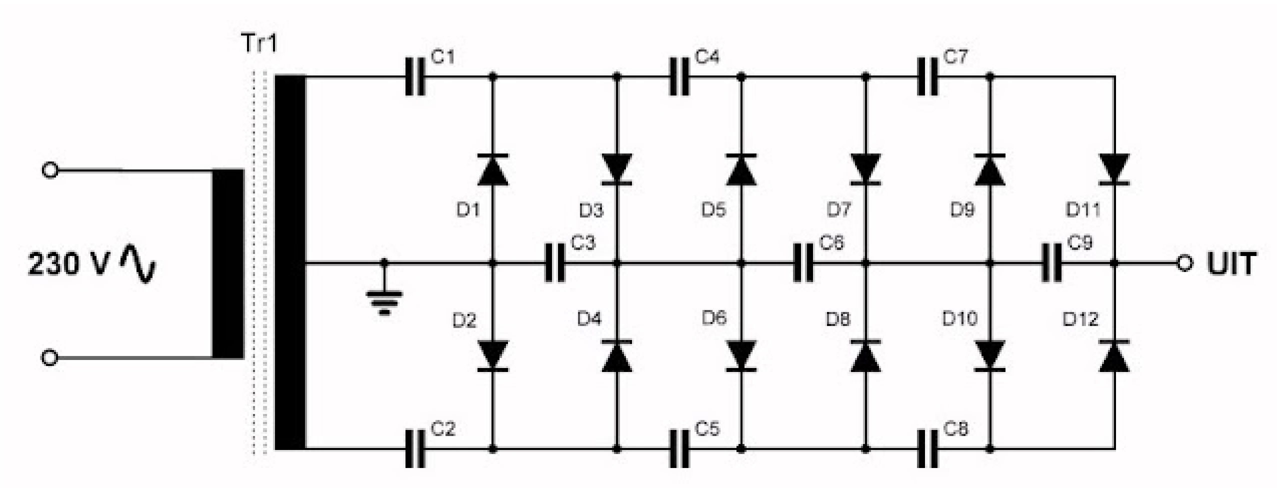
Hoogfrequent generator als ingangsschakeling

Natuurlijk moet u een schakeling hebben die de noodzakelijke hoogfrequent wisselspanning van meerdere kV's genereert. U kunt zélf gaan experimenteren met een 555 oscillatortje met een eindtrap die een hoogspanningstrafo uit een oude TV voedt. Maar uiteraard zijn ook hiervoor kant-en-klare printen te koop. In de onderstaande afbeelding ziet u een printje dat wordt gevoed uit een gelijkspanning van 5 V tot 15 V en op de uitgang twintig keer per seconde een wisselspanningspuls van 5 kV tot 20 kV genereert. Dit schakelingetje kost slechts € 9,60 bij de Thanks-YouBuy Store (via AliExpress).



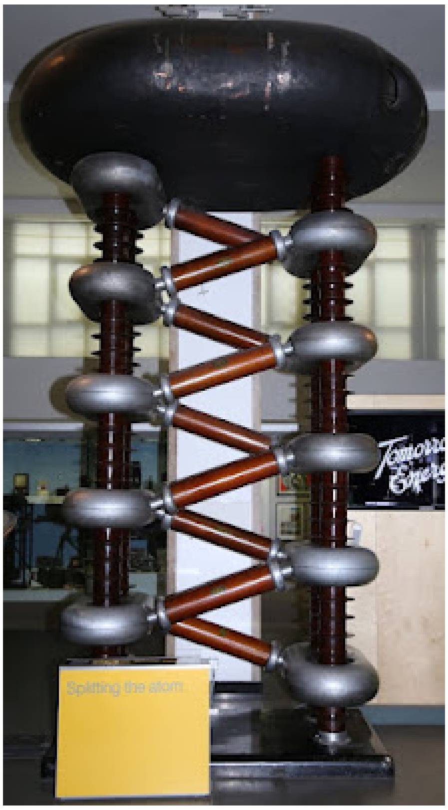
Een 20 kV generator voor het voeden van een Cockcroft-Walton cascade.
(© AliExpress)

De schakeling van Cockcroft-Walton met volle periode gelijkrichting
De beschreven schakeling heeft als nadeel dat zij werkt met halve periode gelijkrichting en dus last heeft van een grote rimpel op de uitgangsspanning. Men heeft een alternatieve Cockcroft-Walton-schakeling ontwikkeld die gebruik maakt van volle periode gelijkrichting. Het schema is getekend in de onderstaande figuur en is in wezen niets anders dan twee standaard schakelingen die met elkaar zijn gecombineerd.



Cockcroft-Walton met volle periode gelijkrichting. (© 2021 Jos Verstraten)

Cockcroft-Walton generatoren en de wetenschap
Er zijn tal van wetenschappelijke onderzoeksterreinen waar zeer hoge gelijkspanningen onmisbaar zijn. Denk maar aan deeltjesversnellers! Hiervoor worden nog steeds zeer grote Cockcroft-Walton generatoren gebouwd. In de onderstaande foto ziet u zo'n generator die in 1937 werd gebouwd door Philips en die in het Manhattan-project in Amerika werd gebruikt bij het ontwikkelen van de technologie van kernsplijting. Deze Cockcroft-Walton generator staat nu in het National Science Museum in Londen.

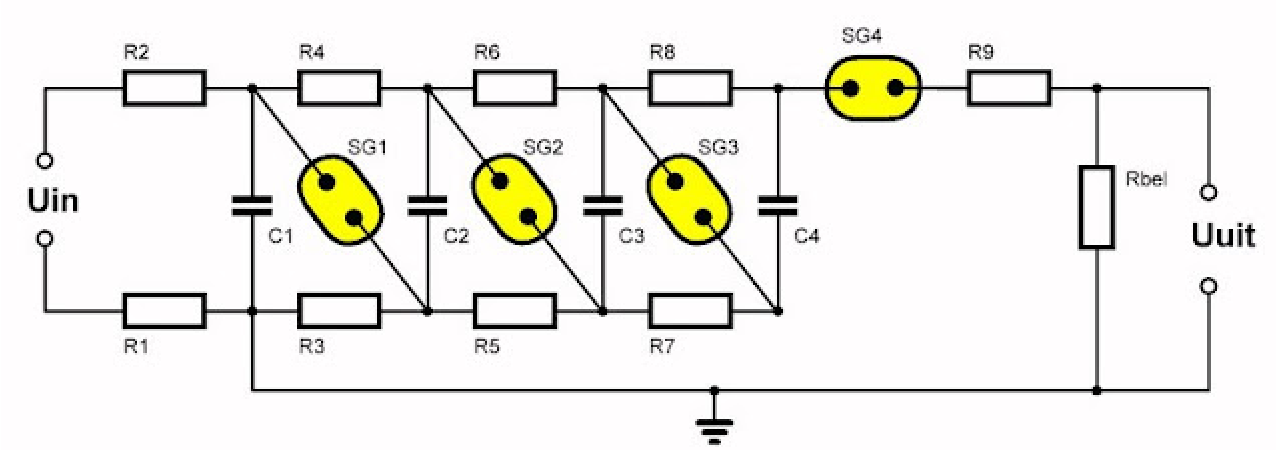


Een Cockcroft-Walton die in 1937 werd gebouwd door Philips.
(© 2012 Wikimedia Commons - Geni)

De Marx-generator

Inleiding
De Marx generator werd voor het eerst beschreven door Erwin Otto Marx in 1924. De schakeling is in staat een korte hoogspanningspuls te genereren uit een veel lagere gelijkspanning. Marx generatoren worden nu nog steeds in de wetenschap en techniek gebruikt, bijvoorbeeld in hoog-energetische natuurkundige experimenten en om de gevolgen van blikseminslag op stroomkabels en luchtvaartapparatuur te simuleren.

Het principe van de Marx-generator
Het principe van de schakeling, voorgesteld in de onderstaande figuur, is zowel uiterst voor de hand liggend als uiterst geniaal. Het idee is dat identieke hoogspanningscondensatoren eerst parallel worden geschakeld over de ingangsspanning en via serieweerstanden tot deze spanning opladen. Nadien worden de condensatoren in serie geschakeld zodat alle condensatorspanningen worden opgeteld op de uitgang van de schakeling.
In de onderstaande figuur is dit idee uitgewerkt voor een Marx-generator met vier trappen. Op een bepaald moment wordt de spanning over de eerste condensator C1 zo groot dat de over deze condensator aangebrachte vonkbrug SG1 doorslaat en een vonk produceert. Die vonk ioniseert de atomen tussen de twee contacten van de vonkbrug waardoor de weerstand tussen deze contacten heel laag wordt. Het gevolg is dat de condensatoren C1 en C2 in serie komen te staan en deze somspanning, gelijk aan twee maal de ingangsspanning, de vonkbrug SG2 doet doorslaan. Op deze manier zullen alle vonkbruggen in een fractie van een seconde een na een doorslaan waardoor alle condensatoren in serie komen te staan. Hoewel op dat moment nog lang niet alle condensatoren zijn opgeladen tot de ingangsspanning zal er tussen de massa en de uitgang een zeer hoge pulsspanning ontstaan. Deze is zo hoog dat u er vonken van tientallen cm mee kunt maken.
De laatste vonkbrug SG4 isoleert de schakeling van de belasting tijdens het opladen van de condensatoren. Zonder deze vonkbrug zou de belasting R_{bel} verhinderen dat de condensatoren worden opgeladen. Op het moment dat de vonkbruggen gaan vonken wordt de spanning over SG4 uiteraard zo groot dat ook deze ook gaat vonken en de spanning over de in serie geschakelde condensatoren aanbiedt aan de belasting. Op de uitgang ontstaat een korte spanningspuls die idealiter gelijk is aan [$n \bullet U_{in}$], waarbij n het aantal trappen van de cascade is. Maar in de praktijk zal de uitgangsspanning aanzienlijk lager zijn omdat, zoals reeds geschreven, niet alle condensatoren tot de maximale waarde worden opgeladen.
Door de ontladingsstroom gaan de spanningen over de condensatoren snel dalen. De spanningen over de vonkbruggen gaan dus ook dalen met als gevolg dat deze een na een doven. Als ook de laatste vonkbrug is gedoofd gaat het proces van voren af aan beginnen en gaan de condensatoren weer opladen.



Het basisschema van de schakeling van Marx. (© 2024 Jos Verstraten)

Optimalisering van het Marx-systeem
Er zijn bronnen die beweren dat de spanningsoverdracht van de individuele condensatoren naar de uitgang geoptimaliseerd kan worden als de diverse vonkbruggen elkaar kunnen zien. Dat zou te maken hebben met het feit dat het ontsteken van een vonkbrug sneller gaat als de brug wordt bestraald met ultraviolet licht. Dat soort straling zit in het elektromagnetische spectrum dat vrijkomt bij een vonkontlading. Het door de eerste vonkbrug uitgestraalde UV-licht zou de tweede vonkbrug sneller laten ontsteken, etc.
Volgens dezelfde theorie kunt u een Marx-generator op uw commando laten vonken door de eerste vonkbrug te bestralen met het licht van een UV-LED. U moet er dan wel voor zorgen dat de ingangsspanning zo klein is dat de vonkbruggen niet spontaan gaan ontsteken.

Een Marx-generator als bouwset
Door diverse Chinese bedrijven worden goedkope Marx-generatoren aangeboden waarmee u spectaculaire vonken kunt trekken. Het onderstaande bouwpakket wordt bijvoorbeeld geleverd door Banggood voor een prijs van ongeveer vijftig euro. Dit pakket bevat een Marx-schakeling die u moet voeden met een gelijkspanning van 20 kV en die een pulsspanning genereert van ongeveer 200 kV!



Een bouwpakket van een Marx-generator. (© Banggood)

De Tesla-spoel

Inleiding
Een Tesla-spoel is een onderdeel dat in 1891 werd ontworpen door Nikola Tesla en werkt als transformator die in hoogfrequent resonantie wordt gebracht. Hij wordt gebruikt om hoogfrequente hoogspanning te produceren. Tesla-spoelen werden commercieel tot de jaren 1920 gebruikt in vonkbrug zenders voor draadloze telegrafie. Tegenwoordig worden ze voornamelijk gebruikt voor amusement en educatieve apparaten die vonken genereren.

De kenmerken van de Tesla-spoel
Een Tesla-spoel is niets meer dan een speciale transformator, die gekenmerkt wordt door de onderstaande karakteristieken:

- De primaire wikkeling bevat slechts een paar windingen.
- De secundaire wikkeling bevat honderden tot duizenden windingen.
- Eén aansluiting van de secundaire wikkeling eindigt in een zeer smalle naaldvormige elektrode of in een bolvormige metalen elektrode.

- Tussen de primaire en secundaire wikkeling bevindt zich alleen lucht.
- Beide wikkelingen zijn zo gedimensioneerd dat zij gezamenlijk in resonantie kunnen komen.

Het hoogfrequent magnetisch veld dat hierdoor rond de primaire wikkeling ontstaat wekt in de secundaire wikkeling een zeer hoge secundaire spanning op.
In de onderstaande foto ziet u een typische Tesla-spoel die u in China kunt kopen. De paar windingen van de primaire wikkeling zijn hier geëtst op een stuk printplaat dat rond de secundaire wikkeling is aangebracht.

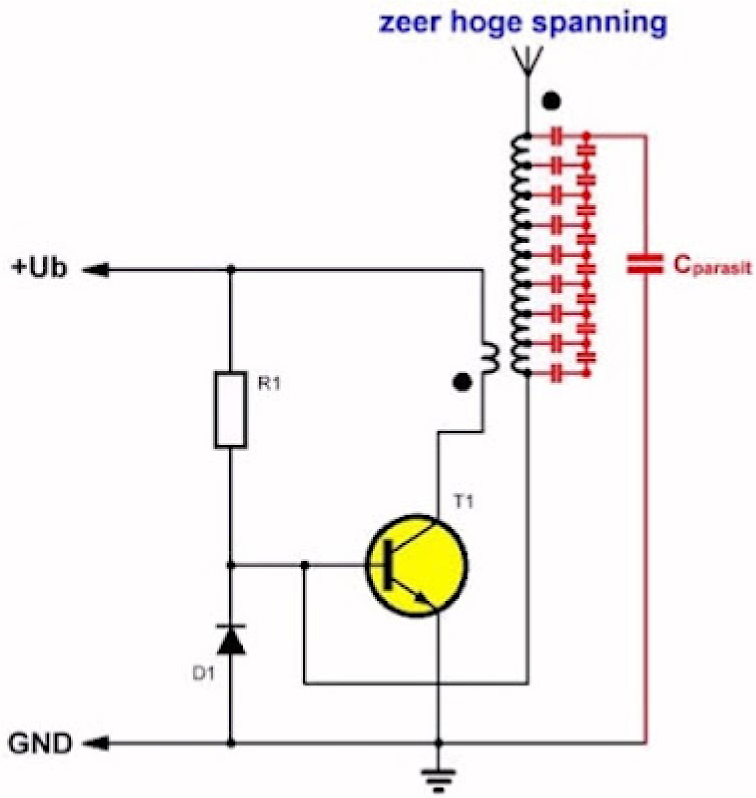


Het typische uiterlijk van een Tesla-spoel. (© AliExpress)

Niet iedere spoel is bruikbaar
Vaak wordt het voorgesteld alsof het volstaat een paar honderd wikkelingen rond een willekeurige luchtkern aan te brengen en daarover dan weer een paar wikkelingen van veel dikkere draad. Er zal vast wel een spanning uit de secundaire komen, maar zo'n constructie voldoet niet aan de basisvoorwaarde van een Tesla-spoel: resonantie. Wilt u een schakeling maken die écht de naam Tesla-generator verdient, dan moet u ervoor zorgen dat de primaire en secundaire wikkelingen identieke resonantie-frequenties hebben. Die frequentie moet bovendien groter zijn dan 50 kHz en kleiner dan 1 MHz.
De resonantiefrequentie van een spoel wordt gegeven door de uitdrukking:
$f_o = 1 / [2 \cdot \pi \cdot \sqrt{(L \cdot C)}]$
L en C zijn hierbij respectievelijk de zelfinductie en de capaciteit van de wikkeling.
Het zal meteen duidelijk zijn dat aan de resonantie-voorwaarde wordt voldaan als:
$L_{prim} \cdot C_{prim} = L_{sec} \cdot C_{sec}$
waarin '*prim*' uiteraard staat voor de primaire wikkeling en '*sec*' voor de secundaire wikkeling.

De werking van de Tesla-generator
In onderstaand schema is de meest eenvoudige schakeling van een Tesla-generator met één transistor getekend. Officieel heet deze schakeling '*single resonant solid state Tesla-generator*'. Hoe kan dit werken? Dat kunt u alleen begrijpen als u in overweging neemt dat ieder voorwerp een bepaalde kleine parasitaire capaciteit heeft ten opzichte van de aarde. De secundaire wikkeling van de Tesla-spoel heeft dat dus ook en het is deze capaciteit $C_{parasit}$ die zorgt voor de voor een oscillator absoluut noodzakelijke terugkoppeling van de uitgang naar de ingang.

Op het moment dat u de voedingsspanning aanzet loopt er via de weerstand R1 een stroom in de basis van de transistor T1. Deze halfgeleider gaat geleiden en het gevolg is dat er een zeer hoge stroom door de paar windingen van de primaire wikkeling loopt. Het sterkt magnetisch veld rond deze wikkeling wekt in de secundaire wikkeling een hoge spanning op. De onderste aansluiting van de secundaire wikkeling ligt aan de basis van de transistor. De terugkoppellus wordt gesloten via de parasitaire capaciteit van de secundaire spoel. Op de basis wordt een negatieve spanning geïnduceerd die via de diode D1 begrensd wordt op een veilige waarde. Dat kan uiteraard alleen als beide wikkelingen van de trafo op de juiste manier gewikkeld zijn. Vandaar de twee zwarte bolletjes bij de wikkelingen, die aangeven dat u de beide wikkelingen in tegengestelde zin moet wikkelen.
De transistor gaat sperren en het wegvallen van de stroom in de primaire wikkeling wekt secundair alweer een hoge spanning op, nu van tegengestelde polariteit. De negatieve spanning die via $C_{parasit}$ op de basis was terecht gekomen gaat nu snel afvloeien. De transistor wordt weer in geleiding gestuurd en de cyclus herhaalt zich.
Besluit: de schakeling gaat op een vrij hoge frequentie oscilleren. In de secundaire spoel wordt een hoge spanning gegenereerd die via de naald- of bolvormige bovenste aansluiting van de secundaire spoel onder het genereren van gasontladingen in de lucht kan ontsnappen.



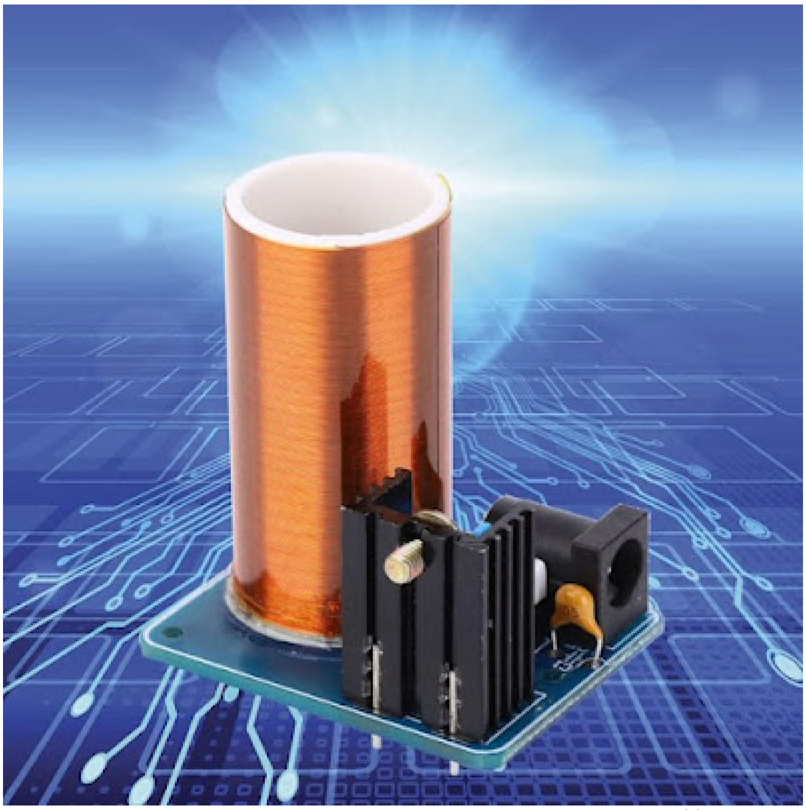
Het eenvoudigste schema van een Tesla-generator.
(© 2024 Jos Verstraten)

Miljoenen volt
Met professionele Tesla-generatoren kunt u spanningen van miljoenen volt genereren, zoals uit de onderstaande afbeelding blijkt goed genoeg voor het genereren van meterslange vonken. Voorgesteld is de '*Electrum*', de grootste Tesla-generator die is gebouwd als technisch kunstwerk. Deze generator werd ontworpen door de Nieuw-Zeelandse kunstenaar Leonard Charles Huia Lye en is te bewonderen in het open lucht beeldenmuseum Gibbs Farm in Kaipara Harbour, 47 km ten noorden van Auckland. Deze generator heeft een secundaire spoel die 11,5 m hoog is, verbruikt 130 kW en levert een spanning van 3.000.000 V.



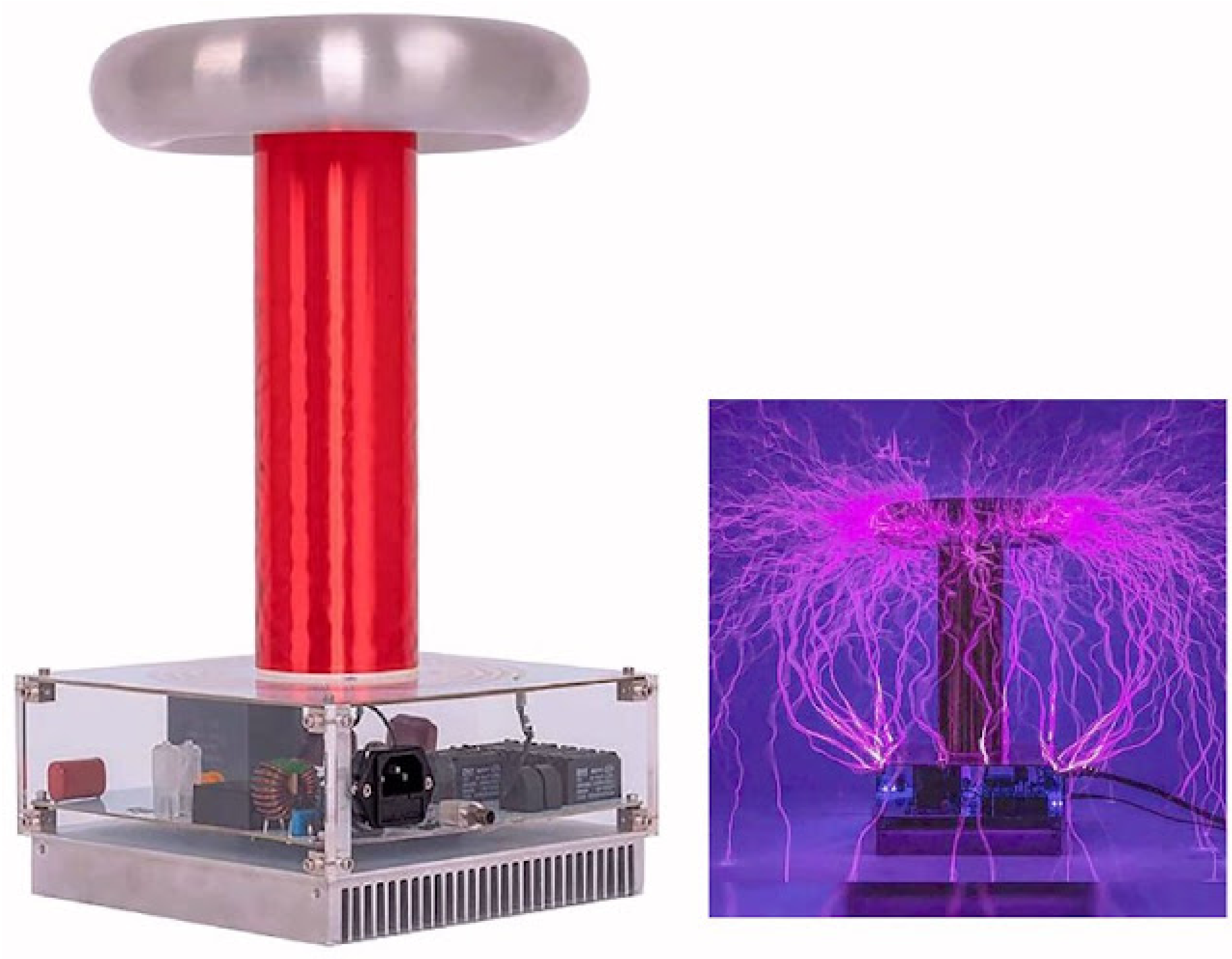
De Electrum, 's werelds grootste Tesla-generator in Nieuw-Zeeland.
(© 2015 Wikimedia Commons - Joe Decker)

De Tesla-generator en zelfbouw
U kunt kiezen uit tientallen bouwpakketten van Tesla-generatoren in alle prijsklassen. In de onderstaande foto is een heel goedkoop ontwerpje voorgesteld, het kost net geen tien euro, waar u niet al te veel van moet verwachten qua vonkgeneratie.



Een heel goedkoop kitje van een Tesla-generator. (© Amazon)

Van een heel ander kaliber is het onderstaande model, dat € 1.250,00 kost maar dat vonken van meer dan vijftig centimeter kan genereren.



Een bouwkit die meer dan duizend euro kost. (© Amazon)